

論文 乾湿繰返しを受けるコンクリート中の鋼材腐食速度に関する検討

上田 隆雄^{*1}・根本 駿^{*2}・七澤 章^{*3}

要旨：コンクリート中の鋼材腐食は、コンクリートの含水状態の影響を強く受ける。さらに、コンクリートの中性化、塩化物イオンや、混和材などの各種要因がコンクリート中鋼材腐食速度に与える影響程度も含水状態で変化するが、定量的な評価には至っていない。そこで本研究では、中性化コンクリート中の鋼材腐食について、水分を初めとする諸要因の影響を明らかにすることを目的として実験的に検討した。この結果、本実験条件では、塩化物イオンを含有しないコンクリートでは中性化だけで自然電位は低下せず、その後の乾湿繰返しによる水分供給によって自然電位は低下したが、実際の鋼材腐食程度は軽微であった。

キーワード：中性化、鋼材腐食、コンクリートの含水状態、電気化学的鋼材腐食指標

1. はじめに

鉄筋コンクリート（以下 RC とする）構造物は、高いアルカリ性のコンクリート中において形成される不動態被膜によって鋼材が腐食から保護されるために、高い耐久性が期待できる。ただし、劣化因子である二酸化炭素（以下 CO_2 とする）や塩化物イオン（以下 Cl^- とする）がコンクリート中に浸透し、コンクリート中で鋼材を腐食から保護する不動態被膜を破壊することで、鋼材腐食が開始すると考えられている。

これに対して、2017 年制定土木学会コンクリート標準示方書[設計編]では、「中性化と水の浸透に伴う鋼材腐食に対する照査」という概念が導入された。この照査においては、コンクリート中の鋼材腐食は、コンクリート中を浸透する水分の鋼材への到達に伴って進行し、鋼材腐食深さの経時的累積値が限界値に達した時を、耐久性上の限界状態と設定している。このような照査の考え方が導入された背景としては、実構造物におけるコンクリート構造物中の鋼材腐食進行プロセスにおいて、中性化よりは降雨等による水分供給が支配要因となっているとの指摘¹⁾がある。すなわち、水分供給の少ない乾燥した環境では、コンクリートの中性化速度は大きい、鋼材腐食の程度は軽微であるのに対して、水掛りのある部位では、比較的中性化速度は小さくとも顕著な劣化が認められる、といった事例が新しい照査法の導入を促したと言える²⁾。

一方で、本照査法で導入された水分浸透に伴う腐食速度の設計式では、コンクリートの中性化の影響が十分に考慮されているとは言えない。また、内在塩分を含有する場合には、中性化と塩害の複合劣化状態の形成に伴って、腐食が顕著に促進される場合があるが、設計や維持管理の基本的な考え方が確立されていない。さらに、フ

ライアッシュ等の混和材の添加は、コンクリート中の鋼材腐食に顕著な影響を与えるが、この点についても、現状では定量的評価には至っていない。

そこで著者は、中性化や塩害の影響を受けた RC 供試体中の鋼材腐食について、乾湿繰返しによる水分供給を行いながら、電気化学的鋼材腐食指標により評価を行った³⁾。この結果、 Cl^- を含有せず、中性化のみ進行しても、鋼材の自然電位は低下せず、腐食開始は認められなかったが、水分供給により自然電位低下が認められた。

本研究では、既報からさらに 1 年程度の乾湿繰返しを継続した時の各種供試体中の鋼材腐食進行状況を電気化学的鋼材腐食指標で評価するとともに、コンクリートからはつり出した鋼材の腐食状況を確認することで、電気化学的鋼材腐食指標による評価の妥当性を検証することとした。

2. 実験概要

2.1 供試体の作製

本研究で用いたコンクリートの配合と諸性状を表-1 に示す。中性化を促進させるために、コンクリートの水セメント比は 60% で一定とした。配合名の N は基準配合で、FA はセメント代替で 30% のフライアッシュを混和した。また NC, FC は、それぞれ N, F 配合に対して、除塩不足の海砂使用を想定して、 Cl^- 量が 3.0 kg/m^3 となるように細骨材代替で NaCl を混入した。表-1 には、材齢 35 日で測定したコンクリートの圧縮強度を併せて示す。ただし、圧縮強度試験は Cl^- 無混入の N および F 配合のみで実施した。

セメントは普通ポルトランドセメント（密度： 3.16 g/cm^3 ，比表面積： $3290 \text{ cm}^2/\text{g}$ ）を用い、細骨材 S は砂岩砕砂（表乾密度： 2.57 g/cm^3 ，吸水率：1.77%），粗骨材

*1 徳島大学大学院 社会産業理工学研究部社会基盤デザイン系教授 博士（工学）（正会員）

*2 徳島大学理工学部社会基盤デザインコース（非会員）

*3 デンカ（株） 青海工場 セメント・特混研究部 博士（工学）（正会員）

表-1 コンクリートの配合と諸性状

配合 名	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m³)								SL (cm)	Air (%)	圧縮強度 (N/mm²)
			C	W	S	G	FA	NaCl	WRA*	AEA**			
N	60	48	300	180	833	902	—	0	1.05	0.0162	18.0	4.7	30.1
NC					828	902	—	4.9	0.9	0.0162	20.0	4.2	—
F			210		819	887	90	0	0.42	0.0336	16.5	3.0	24.9
FC					814	887		4.9	0.42	0.0336	20.0	3.6	—

*WRA : AE 減水剤, **AEA : AE 剤

Gは砂岩碎石（表乾密度：2.57 g/cm³，吸水率：1.60%，Gmax：20 mm）を用いた。また、フライアッシュは JIS A 6201 で規定された II 種フライアッシュ（密度：2.21 g/cm³，比表面積：3970 cm²/g，強熱減量：2.3%）を使用した。

本研究で作製した供試体の概要を図-1 に示す。RC 供試体のコンクリート部分は 100×100×300 mm とし、かぶり 25 mm となるように丸鋼φ13mm を 1 本配置した。コンクリートの打設翌日に脱型し、20℃の恒温室中で 14 日間の封かん養生を行った。その後 20℃，60%R.H. 環境で 4 週間乾燥させ、型枠側面の暴露面 1 面を除いて、他の 5 面についてはエポキシ樹脂を塗布した。

2.2 促進中性化試験および乾湿繰返し試験

養生終了後さらに 4 週間乾燥させた RC 供試体を用いて、JIS A 1153 に準拠した促進中性化（20℃，60 %R.H.，CO₂ 濃度 5%）を実施した。この時の中性化深さの目標値は、20 mm とした。中性化深さ 20 mm は、かぶり 25 mm の RC 供試体の中性化残り 5 mm となるため、コンクリート中の鋼材腐食開始時点を想定して設定した。また、これらの供試体は、促進中性化を実施しない供試体も併せて作製し、促進中性化期間中は、20 °C，60 % R.H.の恒温恒湿室中で気中保管した。

F 配合および FC 配合コンクリートの RC 供試体については、42 日間の促進中性化によって中性化深さが 20 mm 程度に達した後に、乾燥（20 °C，60%R.H.）3 日間、湿潤（40 °C，95%R.H.）4 日間を 1 サイクルとする乾湿繰返しを実施した。ただし、その後 84 日間の乾湿繰返しを行っても促進中性化を行った F 配合供試体の自然電位低下が見られなかったため、さらに 5 mm の中性化を追加してかぶり 25 mm 全体を中性化させるために 28 日間の促進中性化を追加実施した後に、再度乾湿繰返しを行った。N 配合コンクリートは 140 日間、NC 配合コンクリートは 154 日間の促進中性化によってそれぞれ中性化深さが 20 mm 程度に達したため、その後は F 配合および FC 配合供試体と同じ乾湿繰返し環境においてコンクリート中の鋼材腐食促進を実施した。

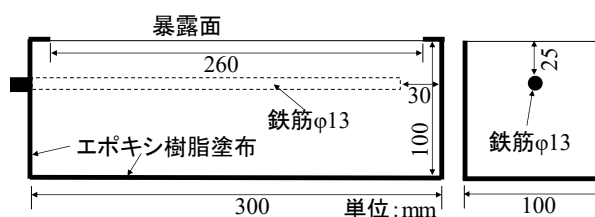


図-1 RC 供試体の概要

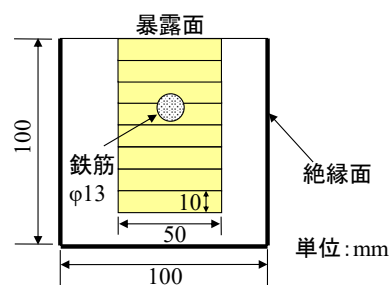


図-2 化学分析用供試体の切断方法

2.3 各種試験

(1) 中性化深さ測定

促進中性化期間中、中性化の進行を確認するために、N および NC 配合は 1 カ月間隔、F および FC 配合は 2 週間間隔を目安として RC 供試体と同時に作製した立方体供試体を割裂し、コンクリート粉を除去した割裂面に対して 1.0 %フェノールフタレイン溶液を噴霧し、JIS A 1152 に準拠した方法により、コンクリートの中性化深さを測定した。この測定値を用いて各配合コンクリートの中性化速度係数を算出し、RC 供試体のコンクリートの中性化深さが 20 mm に達する時期を推測した。

(2) RC 供試体中の各種イオン濃度分布

NC および FC 配合コンクリートの中性化深さが 20 mm に達した時点で、RC 供試体のコンクリート中における Cl⁻濃度分布を測定した。図-2 に示す通り、暴露面から深さ 80 mm までの範囲で切り出した厚さ 10 mm のコンクリートプレート 8 枚を、それぞれ微粉碎したものを分析試料とした。Cl⁻濃度として、JIS A 1154 に準

扱った電位差滴定法により、全 Cl^- 濃度、温水抽出 Cl^- 濃度を測定した。

(3) 電気化学的鋼材腐食指標の測定

乾燥・促進中性化期間中および乾湿繰返し期間中の RC 供試体を用いて、定期的に自然電位、分極抵抗、コンクリート抵抗を測定した。照合電極として飽和銀塩化銀電極 (Ag/AgCl)、対極にチタンメッシュを使用して水道水に浸漬させた供試体全体の平均値として測定を行った。分極抵抗の測定は矩形波電流分極法で印加電流 $100\ \mu\text{A}$ 、周波数 $800\ \text{Hz}$ と $0.1\ \text{Hz}$ のインピーダンス値として求めた。コンクリート抵抗は高周波数側 ($800\ \text{Hz}$) のインピーダンス値として求めた。なお、促進中性化期間また気中保管期間中に測定を実施する場合には、測定前に 3 時間湿布で包むことで供試体を湿潤状態とした。また、乾湿繰返し期間中に測定を実施する場合には、湿潤期間終了後、供試体の湿潤状態を維持したまま、 $40\ ^\circ\text{C}$ 環境から $20\ ^\circ\text{C}$ 環境へ移行した翌日に実施した。

(4) コンクリート中の鋼材腐食状況の確認

乾燥・促進中性化および乾湿繰返しの累計日数が 450 日に達した RC 供試体について、コンクリートを割裂破壊させて内部の鋼材を取り出して腐食状況を確認した。腐食状況は暴露面側とその反対側に分けて目視観察するとともに、透明なフィルムに写し取った腐食部分の面積を画像解析ソフトで測定して、暴露面側とその反対側の各半面に対する腐食面積率を算出した。

3. 電気化学的指標によるコンクリート中鋼材腐食評価

養生終了後に乾燥・促進中性化や、その後の乾湿繰返しを実施した RC 供試体に関して、試験期間中の鋼材自然電位、分極抵抗およびコンクリート抵抗の経時変化を図-3 に、中性化深さ $20\ \text{mm}$ 時点におけるコンクリート中の Cl^- 濃度分布を図-4 に示す。なお、図-3 中の各折れ線グラフの実線部分は促進中性化または気中保管期間中の測定データ、点線部分は乾湿繰返し期間中の測定データを示している。これ以降の図において、凡例は配合名の後ろに中性化深さ (mm) を付した形とする。ただし、前述したように、F20 および FC20 供試体は最終的に $25\ \text{mm}$ 程度まで促進中性化を実施している。

3.1 N 配合および NC 配合供試体

図-3 の自然電位および分極抵抗の経時変化によると、N0、N20 と NC0 供試体は、乾燥・促進中性化期間中は自然電位や分極抵抗の上昇傾向が見られ、その後の乾湿繰返しに伴う水分供給によって、これらの値は低下している。特に N20 は乾湿繰返しに切替えた直後に、自然電位が大きく低下し、分極抵抗も低下していることから、鋼材近傍の pH が低下した状態での水分供給によって、鋼材腐食が開始したものと推定される⁴⁾。ただし、 Cl^-

を含有しない N0 と N20 供試体については、乾湿繰返し開始後も比較的高い自然電位と大きな分極抵抗を維持しており、非常に軽微な腐食状態が推測される。一方、NC0 供試体は $3.0\ \text{kg}/\text{m}^3$ の Cl^- を初期混入しているため、N0、N20 よりは低い自然電位と分極抵抗を示しているが、コンクリート中の鋼材腐食促進の観点からは小さい Cl^- 濃度であるため、ASTM C876-91 の判定基準⁵⁾における不確定領域 ($-0.24 < E < -0.09\ \text{V vs Ag}/\text{AgCl}$) の下限付近を推移している。

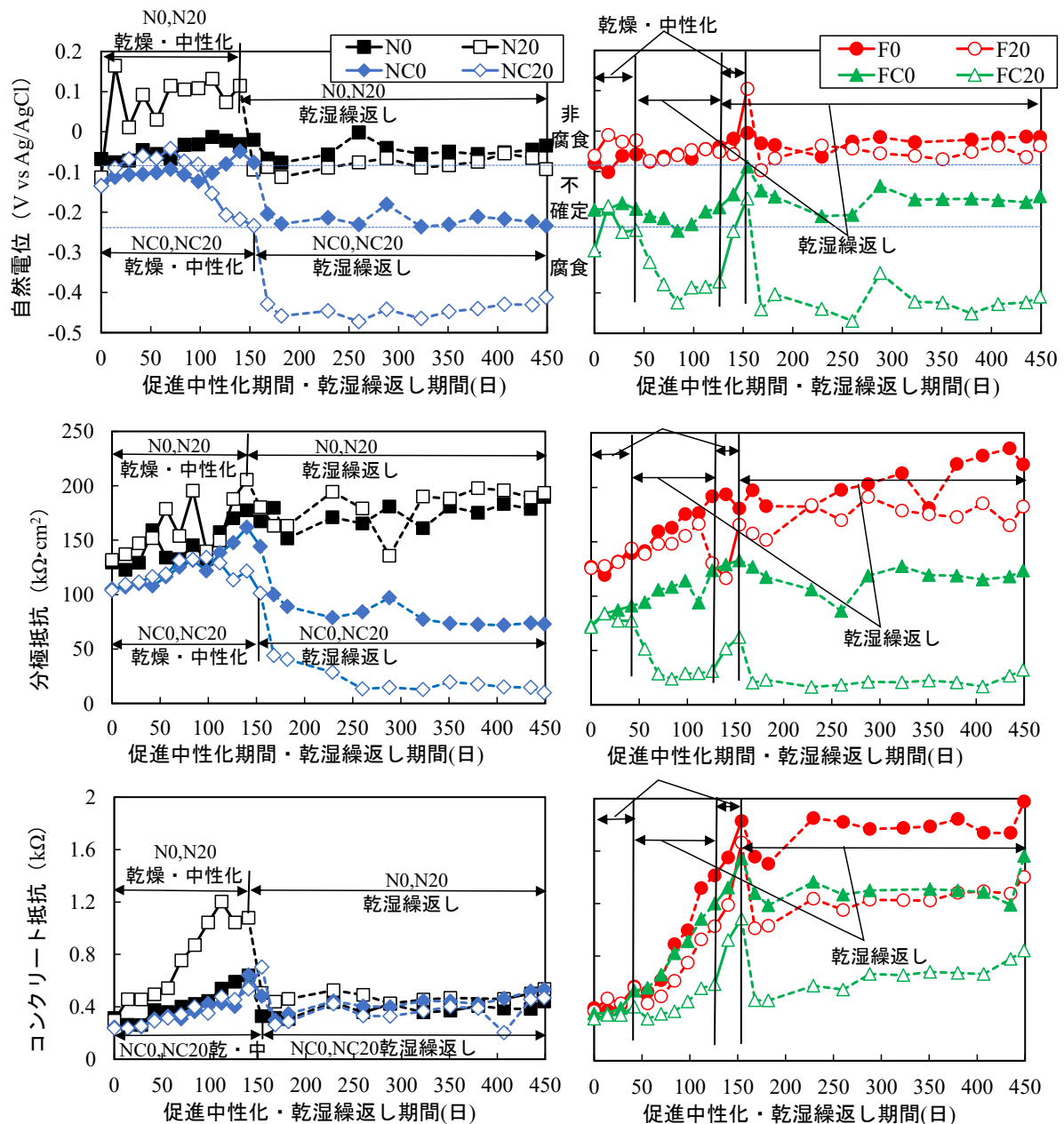
これらに対して、内在塩分と中性化の複合劣化供試体である NC20 供試体は促進中性化期間中に自然電位と分極抵抗の低下が見られる。この場合、図-4 に示したように、中性化フロント部分に Cl^- の濃縮層が形成⁶⁾されており、中性化が進行して Cl^- の濃縮層が鋼材位置に達すると、コンクリートの含水率が低い促進中性化期間であっても、鋼材腐食が開始、進行したものと考えられる。さらに乾湿繰返しによって水分が供給されると、NC0 供試体の場合よりもさらに大きく、自然電位、分極抵抗ともに低下しており、鋼材腐食が大きく加速したものと考えられる。

図-3 のコンクリート抵抗の経時変化によると、乾燥・促進中性化期間中のコンクリート抵抗の増大は N20 供試体が最も大きい。これより、 Cl^- を含有しない場合には、中性化の進行によって、コンクリートの電気抵抗が増大し、腐食電流が流れにくくなるものと考えられる。ただし、乾湿繰返しで水分が供給されると、コンクリート抵抗は大きく低下し、他の供試体と同程度の抵抗値を示している。

3.2 F 配合および FC 配合供試体

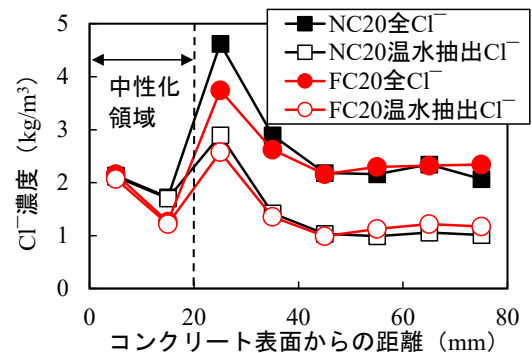
図-3 の自然電位および分極抵抗の経時変化によると、F0 と F20 供試体は、N0、N20 供試体と同様に促進中性化期間中の自然電位や分極抵抗の低下は見られないことから、中性化残り $5\ \text{mm}$ まで中性化が進行しても、乾燥したコンクリート中では鋼材腐食は進行していないと考えられる。また F20 は、最初の促進中性化終了後に乾湿繰返しに切り替えた際に一度、分極抵抗が低下したが、その後の $25\ \text{mm}$ までの促進中性化やさらに乾湿繰返しを行っても、自然電位、分極抵抗ともに高い値を保持しており、N0、N20 と同程度の非常に軽微な腐食状態が予想できる。フライアッシュを混和することで物質移動抵抗性は向上することから、F20 供試体への水分供給は、N20 供試体の場合より抑制されたことも鋼材腐食抑制に寄与したものと推定される。

Cl^- を含有する FC0 と FC20 供試体は、乾燥・促進中性化開始時から NC0、NC20 供試体より、自然電位と分極抵抗が低い。これは、FC 配合はフライアッシュをセメント代替で 30% 混和していることから、前報³⁾ に示



図－3 RC 供試体の電気化学的鋼材腐食指標の経時変化（左：N, NC 配合供試体，右：F, FC 配合供試体）

したように、細孔溶液の pH が NC 配合より低下しており、 Cl^-/OH^- モル比が上昇することで、鋼材自然電位や分極抵抗が相対的に低くなったものと考えられる。ただし FC0 供試体は、乾湿繰返しによる水分供給を行っても自然電位や分極抵抗の低下はほとんど見られず、概ね NC0 より大きい分極抵抗で推移していることから、水分供給による鋼材腐食の促進効果は小さいものと考えられる。一方、FC20 供試体については、促進中性化後の乾湿繰返しによって、自然電位、分極抵抗ともに大きく低下しており、NC20 と同様の厳しい鋼材腐食環境が形成されたものと考えられる。



図－4 中性化深さ 20 mm 時点におけるコンクリート中の Cl^- 濃度分布

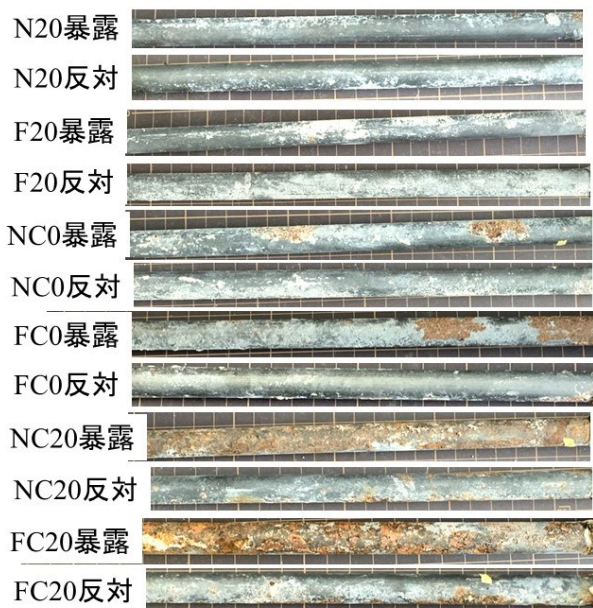


図-5 コンクリート中鋼材の腐食状況例

図-3 のコンクリート抵抗の経時変化によると、F、FC 配合コンクリートの電気抵抗は、フライアッシュのポゾラン反応の進行によって、総じて N、NC 配合より大きく、経時的な増大も見られるが、促進中性化を行った F20、FC20 供試体の値は中性化していない場合より顕著に低い。これは前報³⁾に示したように、促進中性化による細孔構造の粗大化が原因と考えられる。

4. コンクリート中の鋼材腐食状況

養生終了後に 450 日間の乾燥・促進中性化および乾湿繰返しを実施した RC 供試体から取り出した鋼材の腐食状況の例を図-5 に、暴露面側とその反対側の鋼材腐食面積率の平均値を図-6 に示す。なお、写真は暴露面側とその反対側の腐食状況を上下に並べて示している。また、N0 および F0 供試体から取り出した鋼材については、目視では腐食が確認されなかったため、これらの図には、N0 および F0 以外の供試体の鋼材についての測定結果を示している。

これらの図によると、 Cl^- を含有せず、中性化のみが進行した N20 および F20 供試体中の鋼材は、暴露面側に非常に軽微な点さび程度の腐食が見られ、腐食面積率は 1%未満となっている。図-3 に示した自然電位と分極抵抗の経時変化からも、N0 と N20、F0 と F20 は同様な値で推移しており、いずれも腐食の程度は軽微であることが予想されたが、実際の腐食状況もこれに一致していた。N20 と F20 は点さびが確認されたため、不動態被膜は破壊され、非常に小さい腐食速度で腐食が進行していると言えるが、このレベルの腐食進行を電気化学的に検出することは、測定精度の面から難しいと考えられる。

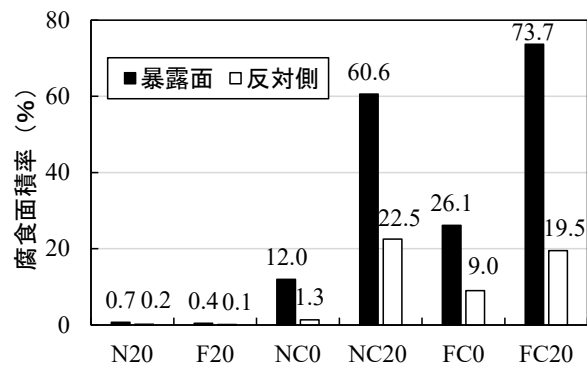


図-6 コンクリート中鋼材の腐食面積率

NC0 と FC0 供試体の鋼材は、初期含有 Cl^- の影響でいずれの場合も図-5 に示すように、暴露面側に面的な腐食が確認できる。これらの供試体は、 3.0 kg/m^3 の Cl^- がほぼ均一に分布しているはずだが、乾湿繰返しによって水分と酸素の供給が大きくなった暴露面側で腐食反応が進みやすかったものと考えられる。なお、図-3 において、乾湿繰返し期間中の分極抵抗値は NC0 より FC0 の方が大きい値で推移しているが、図-6 に示した腐食面積率は、FC0 の方が大きくなっている。図-3 に示したように、FC0 はフライアッシュ混和の影響で NC0 よりコンクリート抵抗が顕著に大きくなっており、かぶり部分の等価回路²⁾に組み込まれた分極抵抗値が影響を受けた可能性がある。

NC20 と FC20 供試体の鋼材は、内在塩分と中性化の複合劣化により、図-5 に示すように、最も激しい腐食が観察される。ただし、この場合も NC0 および FC0 供試体の場合と同様に、腐食はほとんどが暴露面側で進行しており、反対側の腐食程度は軽微である。この場合は、暴露面から進行した中性化の影響で、図-4 に示すような鋼材近傍で Cl^- の濃縮層が形成される不均一な Cl^- 濃度分布により、鋼材の暴露面側がアノード、反対側がカソードとなるような腐食電池が形成されたものと考えられる。この場合も、図-6 に示すように、暴露面の腐食面積率は NC20 より FC20 の方が大きくなっている。FC20 は前述したように、最終的に鋼材位置の 25 mm まで中性化させていることと、フライアッシュ混和の効果で鋼材位置の OH^- 濃度が大きく低下し、 Cl^-/OH^- モル比が増大することで NC20 より腐食促進効果が大きくなったものと考えられる。

5. コンクリート中鋼材腐食速度の評価

本章では、本実験で測定された分極抵抗値を用いて、鋼材腐食速度の推定を行う。図-3 において、すべての RC 供試体が乾湿繰返しに入った 168 日目以降に測定された分極抵抗値の平均値と、この分極抵抗値から算出される鋼材腐食電流密度および鋼材腐食速度の一覧を表-

表－2 乾湿繰返し期間中に測定された分極抵抗の
平均値と鋼材腐食電流密度および鋼材腐食速度の推定値

	R_p ($k\Omega \cdot cm^2$)	I_{corr} ($\mu A/cm^2$)	V_{corr} ($\times 10^{-3}mm/年$)	促進 倍率
N0	174.3	0.149	1.73	1.00
N20	180.9	0.144	1.67	0.96
NC0	81.0	0.321	3.72	2.15
NC20	20.9	1.24	14.43	8.34
F0	205.9	0.126	1.47	0.85
F20	173.9	0.150	1.73	1.00
FC0	116.1	0.224	2.60	1.50
FC20	21.7	1.199	13.91	8.04

2 に示す。表中の鋼材腐食電流密度 I_{corr} および鋼材腐食速度 V_{corr} は、次式により算出した⁵⁾。

$$I_{corr} = k \cdot (1/R_p) \quad (1)$$

$$V_{corr} = I_{corr} \cdot M / (z \cdot F \cdot \rho) \quad (2)$$

ここに、 k ：定数(0.026 V)、 R_p ：分極抵抗($k\Omega \cdot cm^2$)、 M ：鉄の原子量(55.8)、 z ：鉄のイオン価数(2)、 F ：ファラデー定数(96500 C/mol)、 ρ ：鉄の密度：7.87(g/cm³)

CEB により提案された鋼材腐食速度の評価基準⁷⁾によると、0.2 $\mu A/cm^2$ 未満の鋼材腐食速度は No corrosion となり、N0、N20、F0、F20 は実質的に腐食していないと判定されることになる。また、NC0 と FC0 が該当する 0.2 ～0.5 $\mu A/cm^2$ の場合は低～中程度の腐食速度、NC20 と FC20 が該当する 1.0 $\mu A/cm^2$ 以上の場合は高い腐食速度と判定され、これらの判定結果は、図－5 や図－6 に示した実際の鋼材腐食状況と一致していると言える。

一方で、2017 年制定土木学会コンクリート標準示方書[設計編]では、水分浸透に伴う鋼材腐食速度を 0.4 mg/cm²/年 = 0.51 × 10⁻³ mm/年の 1.2 倍として計算する設計式となっている²⁾。この値は、今回 N0 や N20 で測定された分極抵抗からの推定腐食速度よりさらに小さく、設計値としては危険側の評価になっている可能性がある。

表－2 の右端欄に N0 供試体の鋼材腐食速度推定値を 1 とした時の各供試体の鋼材腐食速度の促進倍率を示した。これによると、N 配合の場合は、中性化を行った N20 の倍率は 1 未満で鋼材腐食速度は増進していない。3.0 kg/m³ の Cl⁻ を内在する NC0 で 2 倍程度、さらに中性化が複合する NC20 で 8 倍程度となっている。これに対して、F 配合では、中性化を行った F20 は F0 より鋼材腐食速度は増進したが、N0 と同程度の鋼材腐食速度となっている。FC0 と FC20 の鋼材腐食速度増進は NC0、NC20 の場合と同様の傾向を示している。ただし、ここ

で示した鋼材腐食速度は非破壊的に測定された分極抵抗からの推定値であるため、鋼材腐食速度の評価方法の標準化が課題である。また、今回の乾湿繰返しでどの程度の水分移動が生じているのか不明であるため、今後はコンクリート中の水分移動を把握した上で、鋼材腐食速度の変化についてさらに検討を進める予定である。

6. まとめ

- (1) 塩分無混入の N または F 配合供試体に鋼材近傍まで促進中性化を行った場合、その後の乾湿繰返しによる水分供給で、一時的に自然電位や分極抵抗は低下するものの、概ね腐食程度は軽微と評価され、実際の鋼材腐食は点さび程度であった。
- (2) 初期混入 Cl⁻ 濃度 3.0 kg/m³ のコンクリートを用いた供試体に対して、乾湿繰返しを実施することで比較的緩やかな鋼材腐食の進行が確認された。また、同様のコンクリートで鋼材近傍まで促進中性化を行った場合、自然電位や分極抵抗は大きく低下し、激しい腐食が確認された。
- (3) フライアッシュを混和した Cl⁻ 含有コンクリートを用いた供試体は、自然電位や分極抵抗は無混和の場合よりやや高い値を示したが、実際の鋼材腐食面積は無混和の場合より大きかった。

参考文献

- 1) 轟俊太郎, 石田哲也, 田所敏弥, 上田 洋：コンクリート中の鉄筋腐食に与える水とコンクリートの中性化の影響, 土木学会論文集, Vol. 75, No. 4, pp. 226-238, 2019.
- 2) 土木学会：2017 年制定コンクリート標準示方書改訂資料 設計編・施工編, コンクリートライブラリー149, 2018.3
- 3) 上田隆雄, 井周茉優, 七澤 章：水分供給が中性化コンクリート中の鋼材腐食に与える影響, コンクリート工学年次論文集, Vol. 43, No.1, pp. 688-693, 2021.7
- 4) 酒井正樹, 神代泰道, 小林利充：中性化後における鉄筋コンクリート試験体の含水状態と鉄筋腐食速度の関係, コンクリート工学年次論文集, Vol. 40, No. 1, pp. 603-608, 2018.7
- 5) 土木学会：コンクリート中の鋼材の腐食性評価と防食技術小委員会 (338 委員会) 委員会報告書, コンクリート技術シリーズ, No. 86, 2009.10
- 6) 小林一輔：コンクリートの炭酸化に関する研究, 土木学会論文集, No.433, V-15, pp1-14, 1991.2
- 7) CEB：Strategies for Testing and Assessment of Concrete Structures affected by Reinforcement Corrosion, Bulletin No. 243, 1998.